

СПИНОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕРЕХОДОВ ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАЛЛ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (НА ПРИМЕРЕ EuO)

Магнитные полупроводники образуют широкий класс соединений с уникальными физическими свойствами, одним из которых является температурно-индуцированный переход металл-полупроводник. Одним из механизмов этого перехода могут являться флуктуации электронной плотности. В работах на основе sd модели была развита спин-флуктуационная теория электронных фазовых переходов, которая позволила описать превращения металл-полупроводник, наблюдаемые в почти ферромагнитных полупроводниках и полуметаллических слабых зонных магнетиках на основе d -металлов (FeSi и $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ с $x < 0.05$). Однако этот подход не применим для ферромагнитных полупроводников на основе редкоземельных металлов (EuO , SmB_6 и т.д.), электронная система которых включает в себя не одну, а две группы сильнокоррелированных электронов (d - и f - типа). Кроме того, значительную роль в формировании свойств этих соединений играет межузельное обменное взаимодействие, которое в совокупности с флуктуациями электронной плотности может привести к флуктуациям энергий электронов, которые ранее не были рассмотрены. В связи с этим в настоящей работе в рамках fd модели развит спин-флуктуационный подход к описанию электронных фазовых превращений металл-полупроводник в системе двух взаимодействующих между собой групп сильнокоррелированных электронов. В рамках развитого подхода показано, что вследствие спин-флуктуационного расщепления спектры f и d электронов перекрываются, химический потенциал попадает в область их перекрытия, поэтому основное состояние EuO – металлическое. Дальнейшая температурная трансформация плотности электронных состояний ведет к уменьшению этого перекрытия, приводя к уменьшению числа электронов в d -зоне (а следовательно, к уменьшению носителей тока). При $T \sim 40$ К энергетическая щель между f и d – состояниями восстанавливается и растет с увеличением температуры, в результате чего возникает полупроводниковое состояние с изменяющимся значением ширины запрещенной зоны. Проводимость ферромагнитного полупроводника EuO обусловлена активацией носителей тока через щель в d зону, а также прыжками электронов по локализованным f -состояниям. При этом энергия активации растет с температурой (из-за продолжающегося роста ширины энергетической щели), причем много быстрее, чем сама температура. Вследствие этого электросопротивление ферромагнитного полупроводника EuO резко возрастает с температурой. При температуре Кюри $T_C \sim 69$ К на зависимости электросопротивления ($\rho(T)$) формируется перегиб, связанный с исчезновением намагнитченности. С дальнейшим повышением температуры среднеквадратический магнитный момент вследствие разрушения ближнего магнитного порядка, обусловленного межузельным обменным взаимодействием, продолжает убы-

вать с ростом температуры (несмотря на рост термодинамических флуктуаций спиновой плотности), что ведет к крупномасштабным флуктуациям энергии обменного взаимодействия, вследствие чего параметры электронного спектра продолжают изменяться и в парамагнитной области (в частности, наблюдается продолжающийся рост ширины запрещенной зоны). При $T \sim 80$ К изменение энергетической щели между состояниями f и d электронов оказывается слабее, чем рост температуры, в результате на зависимости $\rho(T)$ формируется максимум и с дальнейшим ростом T электросопротивление EuO убывает по активационному закону.

Таким образом, выполненные численные расчеты на примере ферромагнитного полупроводника EuO показали, что флуктуации спиновой и зарядовой плотности, обусловленные разрушением дальнего и ближнего магнитного порядков, ведут к температурному изменению электронных спектров как в магнитоупорядоченной, так и в парамагнитной областях, и тем самым могут оказывать сильное влияние на формирование температурных зависимостей электронных свойств ферромагнитных полупроводников.